



CIRAD-Forêt

IDEFOR

Département Forestier

Bingerville - ABIDJAN - Anguédédou
République de Côte d'Ivoire

FORMATION A LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

En collaboration avec le

**PÔLE REGIONAL AFRICAIN
DE THERMOCHIMIE**



Ademe



IEPF



LA CARBONISATION : ASPECTS THEORIQUES ET VOIES TECHNOLOGIQUES

Philippe Girard

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement,
Montpellier, France.

1 - LA SPECIFICITE DE L'UTILISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE - LES CHOIX TECHNOLOGIQUES

Si la "calorie biomasse" reste la meilleure marché dans bien des cas, cette matière première présente des caractéristiques contraignantes :

- grande disparité des gisements : taille, forme, densité, humidité,
- variabilité intraspécifique et interspécifique importante,
- structure nécessitant, un conditionnement d'homogénéisation compatible avec les matériels existants, ou la mise au point d'une multiplicité de matériels pour répondre à chaque besoin.

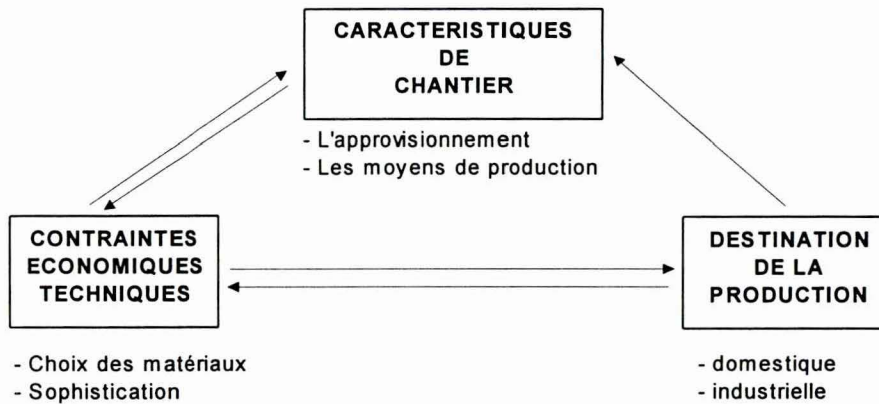
Dans le cas de la carbonisation, les solutions technologiques sont très nombreuses et il est souvent possible par un choix judicieux de matériel, de limiter cette opération de conditionnement.

1.1 - CHOIX D'UN MATERIEL DE CARBONISATION

Les solutions et les choix technologiques sont nombreux comme l'illustre le tableau suivant qui analyse les trois fonctions essentielles que doit remplir un matériel.

Fonction	Système élémentaire	Solution
1 - CONTENANCE - pas d'oxygène - température élevée	ENCEINTE - étanche - résistance thermique	SOUTERRAINE OU AERIENNE terre, brique, métal
2 - PYROLYSE - source de chaleur - propagation de chaleur - évacuation des gaz - contrôle	FOUR foyer de combustion - tirage - orifices ou cheminées -régulation des températures	CHAUFFAGE interne : combustion partielle externe : contact de gaz chaud ou surface d'échange - forcé ou naturel - direct ou inversé - obturateur de tirage et/ou sondes
3 - PRODUCTION	ACCES	DEMONTABLE OU SAS

La multiplicité des solutions a favorisé l'apparition de très nombreuses techniques (presque une par carbonisateur). Il convient de signaler qu'à de rares exceptions près, le rendement massif sur bois anhydre est identique pour tous les matériels, s'ils sont bien maîtrisés. Le choix d'un matériel doit donc être la résultante du meilleur équilibre du triptyque.



Outre les aspects financiers qui doivent être abordés à partir d'une étude économique sérieuse et circonstanciée, deux éléments seront véritablement déterminants dans le choix d'un matériel et la réussite d'un projet :

- l'approvisionnement avec la dispersion du bois (installation fixe, mobile,...), la nature du bois (taille, humidité),
- le savoir-faire et l'adaptabilité du personnel qu'il convient de former à toute innovation. La bonne maîtrise d'une technologie contribue largement aux résultats de production.

1.2. - LE PRIX DU COMBUSTIBLE BIOMASSE

Le bois n'est jamais gratuit, même en cas de non monétarisation, la collecte du bois dans la forêt se réalise au détriment d'autres tâches qui auraient pu être réalisées par la personne et par l'appropriation individuelle d'un gisement parfois sans retour évident pour la collectivité.

Sans développer cet aspect particulier du problème, l'utilisation énergétique du bois nécessite de nombreuses opérations plus ou moins coûteuses en fonction de la spécificité du matériel de conversion. Les différents aspects du conditionnement ont été abordés précédemment.

2 - LES PROCEDES DE CARBONISATION

2.1 - LES SYSTEMES A COMBUSTION PARTIELLE

Les caractéristiques de l'enceinte renfermant la charge à carboniser, permettent de les distinguer. On les classe ainsi en fosses, meules, fours maçonnés et fours métalliques. Lorsqu'ils sont bien mis en oeuvre, tous ces systèmes présentent des rendements relativement voisins (rendements massiques sur anhydre \approx 20-25%). La taille et la facilité de conduite varient beaucoup d'un système à l'autre ce qui confère à chaque système des capacités différentes, des avantages et des inconvénients spécifiques.

2.1.1. Les fosses

Les fosses, plus homogènes en dimensions que les meules, imposent de transporter la matière première. Leur taille peut parfois permettre la carbonisation de très grosses pièces. Leur conduite est d'autant plus exigeante que l'enveloppe supérieure est fragile (terre) et que les conditions d'humidité du sol varient (impossibilité de carboniser en saison très pluvieuse). Equipées d'un toit métallique et de cheminées (Subrifosse), elles deviennent plus régulières et plus aisées à conduire. Le charbon produit est de bonne qualité et apprécié des utilisateurs domestiques et artisanaux.

Bien que ce procédé soit très ancien, il est encore largement utilisé dans les pays en développement. Les fosses, creusées dans le sol, ont en général une forme parallélépipédique ou trapézoïdale. Leur capacité peut varier de 1 à 100 m³ ou plus. Ainsi la durée du cycle de carbonisation se situe entre quelques heures et plusieurs semaines. La couverture est de plus en plus réalisée à l'aide de tôle. On peut également utiliser des matières végétales et de la terre mais ceci impose une surveillance importante pour éviter que la fosse ne s'affaisse trop (apparition de trous) et que la charge ne prenne feu.

2.1.2. Les meules

Les meules, de taille et de forme variable et à l'enveloppe fragile exigent un suivi permanent et un savoir faire important. Chaque nouvelle meule correspond à un cas particulier qu'il faudra apprécier et gérer spécifiquement. Elles permettent par contre de traiter de grands volumes, de se déplacer sur le terrain, de carboniser des pièces de grosse taille (ø 1m et parfois plus) enfin d'obtenir un charbon aux qualités spécifiques fort appréciées des utilisateurs en PED.

La meule est constituée d'un tas de bois disposé autour d'un mat central qui, une fois retiré, forme une cheminée permettant l'allumage puis l'évacuation des fumées. Le tout est recouvert de feuillage, puis de terre afin d'assurer l'étanchéité. Le volume peut varier de 5 à 100 stères. La conduite de ce type de carbonisation nécessite un grand savoir-faire, une surveillance constante. La carbonisation peut durer de 3 jours à plusieurs semaines pour les meules les plus volumineuses.

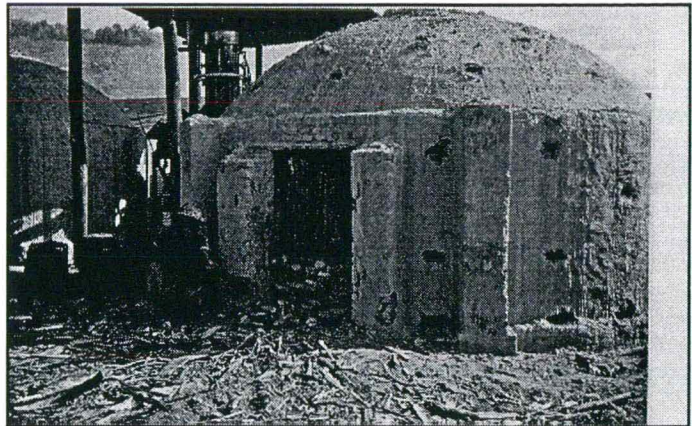


Les meules traditionnelles ont fait l'objet de recherche et d'amélioration notamment au niveau de la construction (mise en place d'une grille de distribution d'air et d'un plancher) et l'évacuation des fumées (par une grande et unique cheminée). Pratiquement abandonnées en Europe en raison du coût de la main d'oeuvre, les meules sont encore très largement utilisées dans les pays en développement. Elles ont l'avantage de ne nécessiter aucun investissement et lorsqu'elles sont

bien maîtrisées elles permettent d'obtenir des rendements de conversion tout à fait comparables aux autres techniques.

2.1.3 - Les fours maçonnés

Les fours maçonnés correspondent aux principaux outils de production du charbon de bois à vocation industrielle (sidérurgie...). Ils sont plus faciles à conduire (taille constante, ouvertures optimisées) et s'accommodent mieux de conditions climatiques défavorables que les précédents mais exigent le transport de la matière première. Les opérations de chargement et de déchargement, rarement mécanisables, sont contraignantes. Les durées de carbonisation restent importantes. Le charbon produit est de bonne qualité (usage industriel).



Généralement en briques, ces fours diffèrent entre eux par la forme de l'enceinte (cylindrique, hémisphérique ou parallélépipédique). Leur volume peut être très variable (quelques m³ à plusieurs dizaines de m³). Ils font appel au tirage direct et au tirage inversé.

Ces fours sont encore très utilisés en Amérique latine (notamment au Brésil - 10 MT/an) et dans certaines régions d'Asie (Malaisie, Thaïlande).

2.1.4 - Les fours métalliques

Les fours métalliques optimisés en volume et équipés d'éléments de conduite (évents-cheminées), sont faciles à conduire. Ils peuvent se déplacer sur le terrain mais, de petite taille et carbonisant en un temps très court, ils exigent un conditionnement important de la matière première (tronçonnage- refente,...). Les charbons produits sont de bonne qualité mais, à caractéristiques chimiques équivalentes, diffèrent sensiblement des charbons cuits plus lentement dans les fours précédents : aspect moins apprécié des utilisateurs domestiques en PED.

Les fours métalliques, comme les fours maçonnés, présentent l'avantage de pouvoir être mis en oeuvre par modules équipés de systèmes de collecte des fumées (cf photo). L'énergie précédemment perdue est ainsi récupérée par incinération (production de chaleur utilisable) ou par condensation (récupération de produits condensables = jus pyrolytiques). Cette valorisation dans la conjoncture actuelle et à venir fait l'objet de travaux de recherche.

Ces types de fours se sont largement développés entre les deux guerres mondiales et correspondent actuellement aux matériels les plus utilisés en Europe. Par rapport aux fosses et aux fours précédents, ils présentent l'avantage d'être mobiles, de petite dimension : 5 à 15 m³ et faciles à conduire. Les cycles de carbonisation sont plus courts (2 jours en moyenne). De nombreuses versions existent qui se différencient essentiellement par leur forme (cylindrique,

tronconique, octogonal, cubique, parallélépipédique....) ainsi que quelques variantes relatives au fonctionnement : mode de tirage (cheminée unique ou multiple, évacuation diffuse des fumées...), système de traitement des fumées.

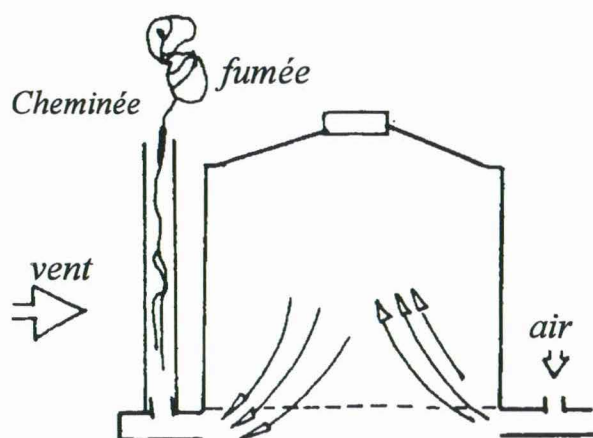
Afin d'améliorer leurs performances et leur régularité, divers aménagements ont été apportés à ce four : pose d'un fond, renforcement de la partie inférieure (acier ou béton réfractaire, double enveloppe avec circulation d'eau, régulation de l'admission d'air.

Les réglementations en matière de limitation de la pollution atmosphérique ont permis l'émergence de matériels plus performants et le développement d'installations de carbonisation fonctionnant sur le principe de modules de 3, 4, 5 ou 6 fours à combustion partielle dont les fumées sont collectées dans un conduit commun puis incinérées. L'énergie ainsi récupérée peut être utilisée notamment pour le séchage du bois avant carbonisation.

Nous passerons rapidement en revue quelques exemples types de fours métalliques caractéristiques des voies technologiques aujourd'hui exploitées, sachant que chacun des principes présentés est susceptible d'une large gamme de variantes.



- four à tirage inversé de type Magnien - Mark IV et V



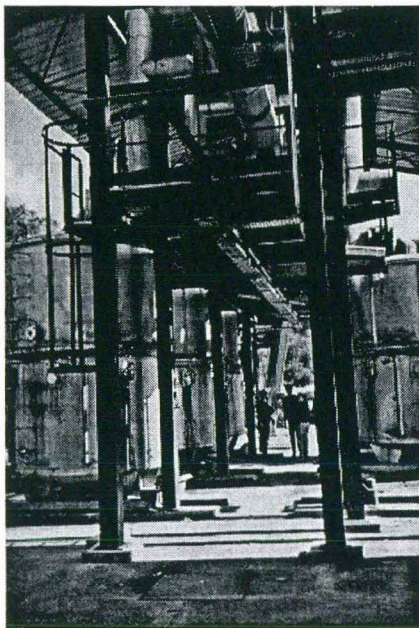
Source: P. GIRARD 1986

Inventé en 1922 par M.Magnien, ce type de four à tirage inversé a connu depuis et sous diverses formes une très grande diffusion. Son fonctionnement, les résultats qu'il permet, ainsi que son prix de revient en font un matériel très compétitif au niveau artisanal. Des qualités qui sous l'appellation MARK IV et MARK V ont aussi valu à ce matériel une large diffusion en pays anglophones et dans les pays en développement.

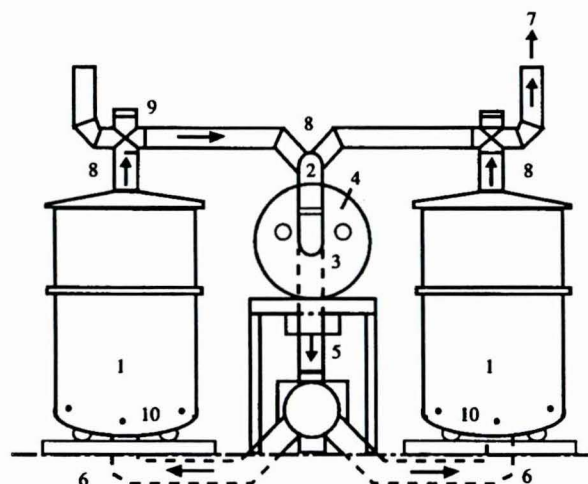
Apprécié pour sa mobilité, ce four est généralement constitué d'éléments emboîtables posés sur 8 boîtes-évents identiques. Equipés de cheminées, ces évents assurent alternativement l'évacuation des fumées et l'admission d'air. L'étanchéité est réalisée par lutage de sable. La capacité du four varie de 4 à 12 m³.

Les innovations technologiques :

- **Pose d'un fond** avec un système de défournement par un sas ou une trappe pour faciliter les manutentions, permettre la mécanisation et éviter le mélange charbon-terre.
- **Renforcement de la virole inférieure.** Trois solutions techniques ont été retenues par les industriels français pour améliorer la durée de vie de la virole basse qui est soumise aux plus hautes températures :
 - construction de la virole inférieure en acier réfractaire,
 - mise en place d'une double enveloppe intérieure en béton réfractaire, très efficace et moins coûteuse que la solution précédente, elle alourdit cependant considérablement le four et limite sa mobilité,
 - mise en place d'une double enveloppe métallique avec circulation d'eau entre les deux parois avec un système de thermo-siphon qui impose une installation fixe. Cet aménagement permet de maintenir la température des aciers à un niveau inférieur à leurs zones de fragilisation. Il permet en outre de disposer d'une source d'eau chaude (100 °C) qui peut être utilisée pour une autre spéculation.
- **Introduction d'un panier de chargement dans le four.** Le cycle de carbonisation terminé, le panier contenant le charbon est défourné à chaud et mis en étouffoir, ce qui permet de libérer rapidement pour un autre cycle l'enceinte de carbonisation. Le refroidissement étant externe, le four peut être parfaitement isolé pour limiter les pertes thermiques.
- **Régulation de l'admission d'air** par un contrôle continu des températures de carbonisation et l'introduction forcée d'air dans le four par l'intermédiaire de vannes réglables. Cette régulation permet la parfaite maîtrise du cycle de carbonisation.



- **Aménagement des conduits de fumée** pour un raccordement à un collecteur. Cette solution permet le traitement des fumées et surtout la récupération de leur énergie potentielle. Ces procédés mettent en oeuvre des batteries de fours métalliques à tirage direct interconnectés et un incinérateur. Chaque four couplé au système est allumé avec un déphasage de telle sorte que le mélange des fumées alimentant l'incinérateur présente toujours une valeur énergétique suffisante. L'incinérateur est adapté à la combustion de gaz pauvre et est alimenté en combustible d'appoint par un brûleur à fuel, à gaz ou à bois. Les gaz chauds sont recyclés dans le process pour le séchage du bois ou utilisés dans tout process associé qui a besoin de chaleur (séchage, etc...).



- 1 = Four
- 2 = Collecteur de fumées
- 3 = Incinérateur
- 4 = Brûleur propane d'appoint
- 5 = Chambre de dilution des gaz
- 6 = Entrée air chaud pour séchage
- 7 = Sortie air humide
- 8 = Sortie des fumées
- 9 = Connection entre fours et collecteurs de fumées(2)
- 10 = Entrée d'air

Source : P. GIRARD et AL 1988

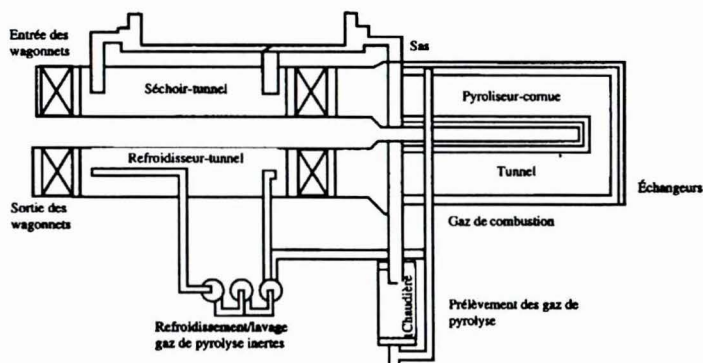
- **Construction de four de forme rectangulaire.** Un four de forme parallélépipédique permet de carboniser des bois et des rondins en grande longueur, ce qui limite le conditionnement du bois.

2.2 - LES SYSTEMES PAR CHAUFFAGE EXTERNE

Nous présenterons deux systèmes très différents aujourd'hui opérationnels au stade industriel.

2.2.1 - Four cornue-tunnel CARBOLISI

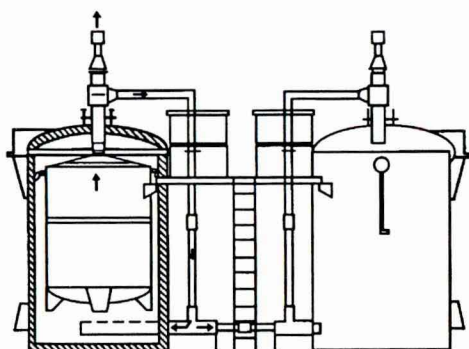
Le procédé original permet d'atteindre des niveaux de production de 5 000 à 6 000 T/an.



Source : L.F. VERGNET 1992

Des wagonnets d'une douzaine de m³ traversent successivement une zone de séchage, une zone de pyrolyse et enfin une zone de refroidissement. L'énergie nécessaire au process résulte de la combustion des fumées de pyrolyse transmise à la charge par l'intermédiaire d'un échangeur thermique. Le fractionnement est limité, les wagonnets parallélépipédiques acceptant des produits de 2m de longueur. Toutes les opérations à l'exception du chargement par chariot élévateur sont automatisées.

2.2.2 - Cornues connectées type ACC



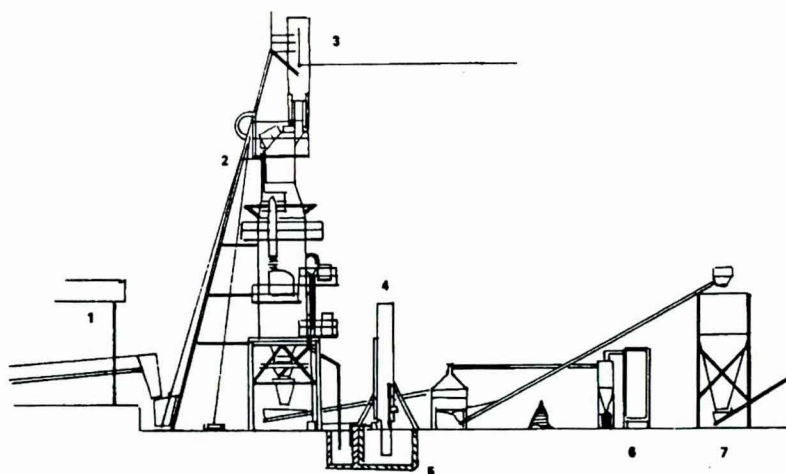
Source : P. GIRARD et AL 1988

Le module de production du four est constitué d'une enceinte verticale isolée dans laquelle vient se glisser une cornue. Les gaz de pyrolyse sont évacués dans la partie haute de la cornue et sont dirigés : vers une torchère pendant la durée du séchage, vers le brûleur situé sous la cornue pour permettre d'entretenir la carbonisation, enfin vers le brûleur d'un autre module dont le cycle se trouve à un stade différent de carbonisation. Par un choix judicieux des déphasages de cycle entre 2-3 ou 4 modules, une unité de production peut optimiser la récupération de l'énergie disponible dans les fumées.

2.3 - LES SYSTEMES PAR CONTACT DE GAZ CHAUDS

2.3.1 - Four du type Lambiotte (Belgique) CSIR

D'une capacité de production variant de 1500 à 2500 t/an, ce four vertical est entièrement automatisé. Les gaz chauds de la zone de carbonisation sont directement réinjectés à la tête du four sans incinération préalable. Le surplus de fumées est brûlé en torchère sans valorisation de l'énergie générée. Ce four ne comporte pas de séchoir en amont. L'humidité de la matière première a de fortes incidences sur les conditions de fonctionnement.



- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Séchoir | 5. Précriblage du charbon de bois |
| 2. Skip de chargement | 6. Dépoussiérage du charbon de bois |
| 3. Torchère à vapeurs pyroligneuses | 7. Stockage du charbon de bois — silos |
| 4. Refroidissement par eau | |

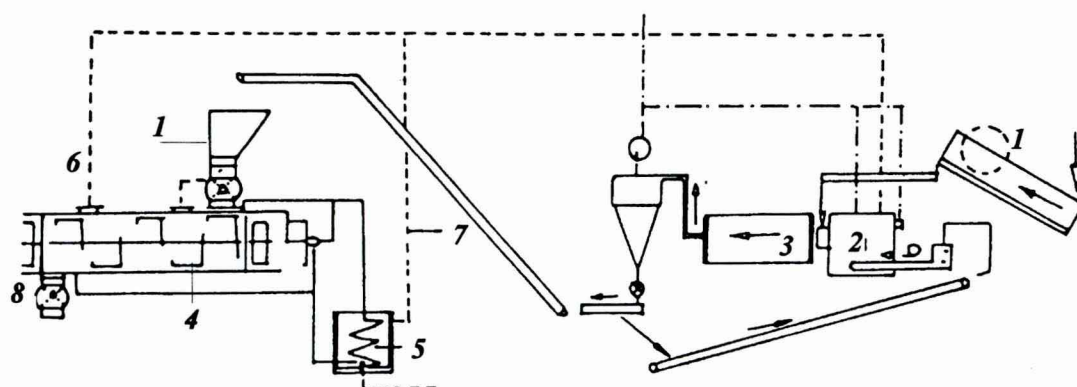
Source : D. BRIANE - J. DOAT 1985

Sur le même principe, le four de type Lambiotte (France) SIFIC à séchage préalable, permet des capacités de 5 000 à 20 000 t/an et peut être associé à une unité de distillation. Les fours de type Lambiotte équipent la majorité des installations dites industrielles continues en Europe (de l'ordre d'une vingtaine).

3 - LES PROCEDES DE TORREFACTION

3.1 - PROCEDES CONTINUS A LIT MOBILE (PAR CONDUCTION)

La seule technologie opérationnelle a été développée par PECHINEY Electrometallurgie sur procédé ARMINES. Une installation équipée d'un four horizontal rotatif a produit 12.000 t/an de bois torréfié pendant trois ans, utilisé pour la réduction du silicium métal.



- | | | | |
|----------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 alimentation | 3 séchoir | 5 chaudière | 7 recirculation gaz chaud |
| 2 brûleur | 4 torréfacteur | 6 recirculation gaz de torréfaction | 8 défournement |

Source : L.F. VERGNET - P. CORTE 1989

Des substituts plus performants ont entraîné l'arrêt de cette unité. La maturité industrielle du procédé peut cependant être considérée comme acquise. Les transferts de chaleur sont réalisés par conduction dans un cylindre à enveloppe chauffante, équipée d'une vis chauffante et dans lequel circulent des maxi plaquettes de bois. Le bon fonctionnement de l'unité exige une programmation importante et un séchage préalable de la matière première.

3.2 - PROCEDES DISCONTINUS A LIT FIXE

Deux technologies ont été récemment expérimentées, reposant sensiblement sur la même principe : les transferts de chaleur sont assurés par convection : circulation forcée d'un gaz chaud inerte au travers d'un volume constant de produit à traiter. Ces procédés peuvent traiter une matière première aux caractéristiques variables (humidité, granulométrie) par ajustement des paramètres de torréfaction (température et débit de gaz vecteur, temps de séjour...).

Il s'agit du **Procédé "VICARB"** dans lequel la phase de séchage est réalisée dans un réacteur spécifique et en préalable à la torréfaction et dont la capacité de production est de l'ordre de 4 000 t/an et du **Procédé FAGES-HABERMANN** constitué d'un module de deux fours dans chacun desquels s'effectuent les phases de séchage et de torréfaction et qui permet d'assurer une production de 600 t/an.

Ces procédés sont susceptibles d'une diffusion dans l'hypothèse où le marché du bois torréfié trouverait un développement significatif, ce qui n'est pas aujourd'hui le cas (prix de revient, habitudes des consommateurs,...) dans le domaine énergétique. Législation environnementale, optimisation de la valorisation des ressources ligneuses et traitement du bois d'oeuvre, pourraient cependant faire évoluer cette situation pour le moyen terme.